

# **Técnicas de Reforço a Usar numa Construção Tradicional Danificada pelo Sismo de 9/7/98 na Ilha do Faial, Açores**

**Aníbal Costa**

*Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*

**António Arêde**

*Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*

**Domingos Moreira**

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*

**Nuno Neves**

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*

*Palavras Chave:* Modelação, Património, Danos, Reforço, Análise Sísmica

## **RESUMO**

Este trabalho pretende evidenciar as técnicas de reparação e reforço que estão a ser implementadas na reconstrução das moradias da Ilha do Faial, que foram afectadas pelo sismo de 9 de Julho de 1998 nos Açores.

Para o efeito apresenta-se o caso de um edifício de habitação e comércio situado no centro da cidade da Horta, fazendo a sua descrição estrutural e dos danos sofridos na sequência daquele sismo. A estrutura foi numericamente analisada sob a acção dos acelerogramas registados no Observatório do Príncipe de Mónaco, situado na Cidade da Horta, Faial, Açores, sendo apresentados alguns dos resultados obtidos.

Em face de tais resultados da análise sísmica e da compreensão dos danos observados, são propostas técnicas de reforço que irão ser implementadas nas obras de reconstrução daquelas moradias.

## **1.- INTRODUÇÃO**

Este trabalho refere-se ao estudo do edifício sito na Rua de Serpa Pinto, n.º 1 da freguesia Matriz, concelho de Horta na ilha do Faial, ilustrado na fig.1. Este edifício tem a sua implantação num dos locais mais importantes da cidade da Horta, apresentando a sua traça com imponência, e desenvolve-se em quatro pisos um dos quais comercial e três de habitação.

Os vãos alternam entre padieiras rectas e arcos, sendo os rebocos exteriores pintados de verde claro com elementos decorativos executados em argamassa saliente com pintura branca a contrastar com o fundo. O último piso aproveita as águas furtadas da cobertura e apresenta sete mansardas de belo efeito decorativo nos vários alçados, em particular as mansardas dos dois "gavetos", onde se registam bonitos frontais.

O rés-do-chão tem ocupação comercial, com excepção da zona de entrada para os pisos superiores. O piso do 1º andar, tal como os seguintes, tem no seu interior um quarto de arrumações que é envolvido por um corredor de distribuição permitindo a ligação entre os vários compartimentos desta habitação, que constam de uma sala, com um quarto anexo, cozinha, um quarto de banho, um quarto interior e um quarto principal virado para a enseada da Horta. Existe ainda um quarto que comunica com a sala por intermédio duma porta grande. No

último piso os tectos têm as inclinações da cobertura com as várias mansardas salientes, que se desenham no tecto dos compartimentos conforme se pode observar na fig. 1.



*Figura 1 – Vistas do prédio, salientando-se as mansardas salientes*

As paredes exteriores deste edifício são bem construídas com alvenaria de pedra aparelhada. A parede das traseiras foi parcialmente refeita após o sismo de 1973, com recurso a alvenaria de blocos de bagacinas conforme era uso na época.

Tal como as paredes exteriores, os cunhais são construídos com alvenaria aparelhada de pedra. Aquando da execução das paredes, as pedras de maiores dimensões eram escolhidas para os cunhais a fim de realizarem um melhor contraventamento das paredes aí concorrentes.

As paredes interiores dos vários andares são de tabique, com excepção das paredes do estabelecimento comercial que são de alvenaria de blocos e que foram executadas nas últimas obras de remodelação realizadas em 1995.

No entanto, uma das paredes interiores do quarto interior desempenha funções estruturais (não se podendo porém considerar como uma parede mestra) tendo no seu interior uma estrutura composta por pilares de madeira que dão apoio a um conjunto de vigas, também de madeira, e que vão suportando os vários pisos até à cobertura.

Os tabiques de duas faces são de interior oco e constituídos por um fasquiado de ripas de madeira dispostas na horizontal e fixadas aos prumos deixando uma caixa de ar com cerca de 7cm. O fasquiado é depois emboçado e rebocado com uma argamassa de cal, ficando a parede com uma espessura total de 9 a 10 cm.

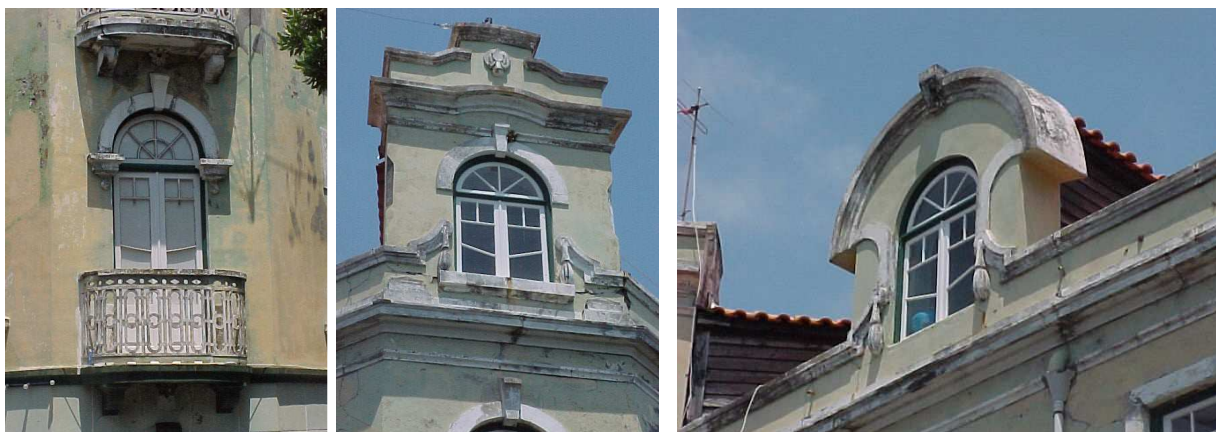
As alvenarias de blocos utilizadas nesta habitação são do tipo tradicional com blocos de bagacinas, areia e cimento, assentes com argamassa normal e com acabamento rebocado e pintado. A espessura dos blocos varia entre os 10cm e os 20cm consoante se tratam de paredes divisórias interiores ou paredes resistentes exteriores, respectivamente.

Os arcos visíveis em alguns vãos da fachada são realizados em alvenaria de pedra de acordo com os preceitos usuais, e conforme se ilustra na fig. 2.

Aquando da visita ao local, a proprietária referiu a existência de elementos metálicos que atirantam esta construção, não tendo sido possível no entanto localizá-los. Porém, no rés-do-chão existem pilares metálicos que desempenham funções estruturais.

A cobertura é à francesa, com uma estrutura de madeira que dá apoio à telha do revestimento exterior, conforme se pode observar na fig. 3. Por sua vez, as plantas estrutural e de arquitectura de um dos pisos estão representadas na fig. 4.

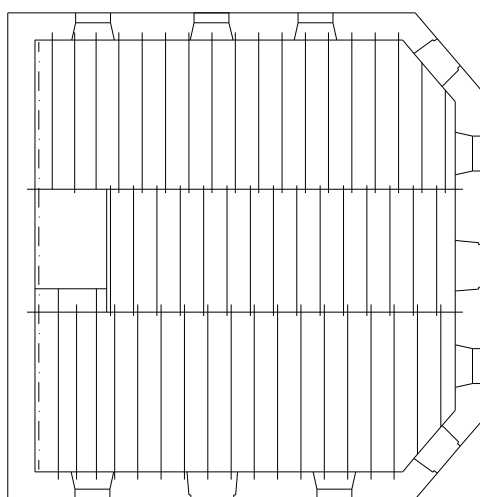
O pavimento do piso comercial é de betonilha com revestimento de acabamento e os restantes pisos são de soalho de madeira. As escadas interiores são também de madeira e suportadas por uma estrutura do mesmo material.



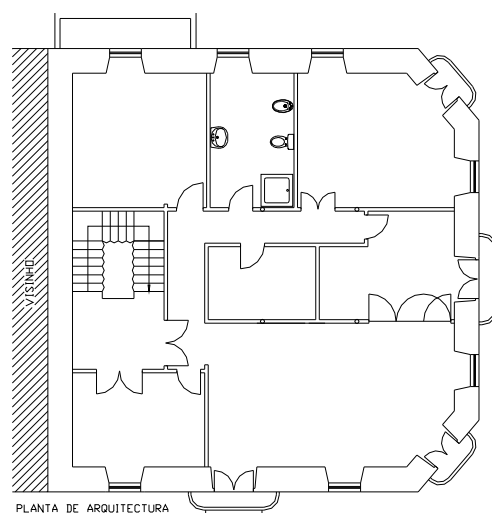
*Figura 2 – Pormenores da fachada*



*Figura 3 – Pormenores da cobertura do edifício realizada em estrutura de madeira*



PLANTA ESTRUTURAL DO PAVIMENTO  
PISO 2



PLANTA DE ARQUITECTURA  
PISO 1

*Figura 4 – Planta de estruturas e de arquitectura do edifício sito na Rua Serpa Pinto, n.º 1*

## 2.- COMPORTAMENTO OBSERVADO DE ALGUNS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Duma análise global, a estrutura do edifício apresentou um razoável comportamento face à intensidade do sismo que a solicitou. Tal facto ter-se-á ficado a dever à boa execução das paredes exteriores que terá impedido a ocorrência de danos bem mais importantes.

No entanto, verificou-se o aparecimento de bastantes fissuras na interligação das paredes exteriores com as interiores e tectos (ver fig. 5), principalmente nos pisos mais elevados, em virtude de os pavimentos não garantirem o funcionamento de conjunto deste edifício que apresenta já uma altura apreciável para uma construção de alvenaria.



*Figura 5 – Fissuras na ligação das paredes interiores às exteriores*

A cobertura, tal como o tecto do último piso, deve ter sofrido movimentos importantes, pelo que os apoios dos elementos estruturais foram afectados.

Os cunhais, por serem elementos que devem garantir o travamento entre duas paredes, sofreram grandes esforços e foram observadas roturas em todos eles.

Além disso, verificou-se que a maior parte dos tabiques, senão todos, se desligaram das paredes exteriores. O comportamento da cobertura foi satisfatório, não se tendo verificado infiltrações de água, e os elementos estruturais encontram-se em estado razoável.

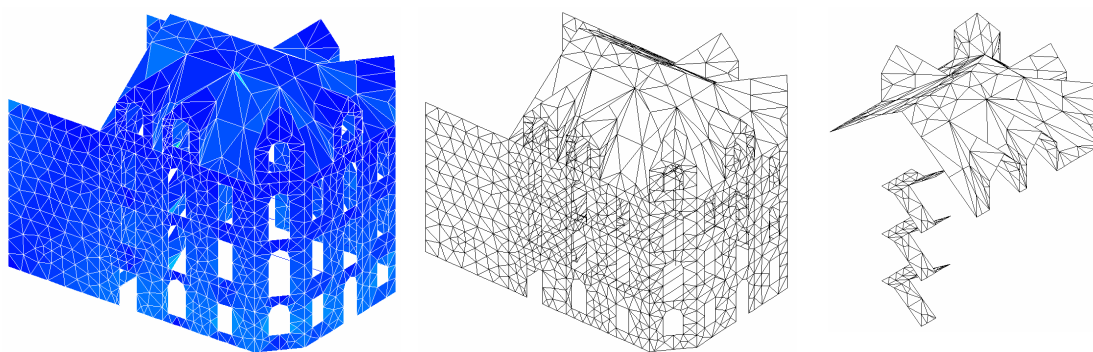
## 3.- ANÁLISE NUMÉRICA DO EDIFÍCIO

O edifício foi discretizado e numericamente analisado pelo método dos elementos finitos e usando o programa de cálculo CASTEM2000 (CEA, 1990), tendo-se adoptado elementos de casca de três nós para modelar as paredes e elementos de barra de dois nós para as vigas e os barrote. Foram modeladas as escadas e as mansardas da cobertura, apresentando-se na fig. 6 algumas das diversas malhas usadas para o cálculo da estrutura.

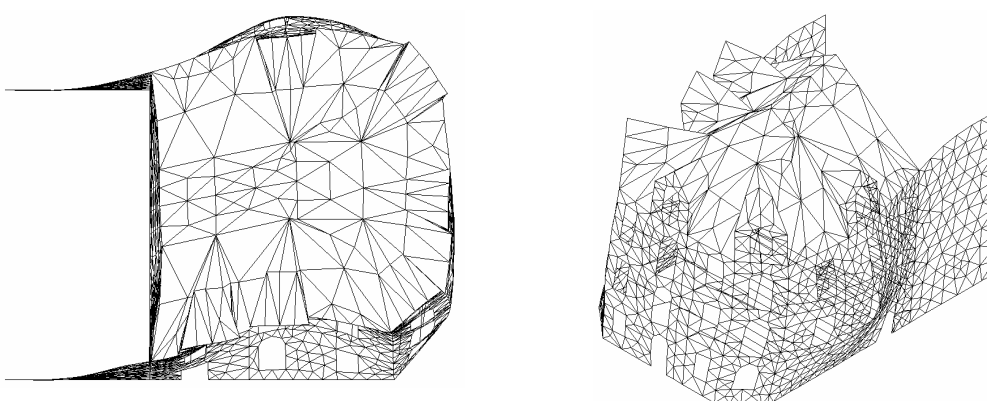
Atendendo à existência de continuidade entre este edifício e o vizinho, materializada pelas paredes da fachada e pela parede de separação que é meeira, foi modelada parte das paredes vizinhas, considerando-se um apoio na respectiva extremidade.

A partir da modelação do edifício foram calculadas as frequências e os respectivos modos de vibração, dos quais se apresentam os dois primeiros nas figs. 7 e 8. Destas duas configurações modais, que são essencialmente de translação segundo cada uma das direcções horizontais principais da estrutura, pode-se observar que as paredes de fachada e empena exibem uma pronunciada deformada de flexão vertical e horizontal associada ao designado efeito de pipa, que advém da falta de apoios horizontais das paredes (ao nível dos pisos) entre a base e a cobertura onde se materializam as principais restrições ao movimento.

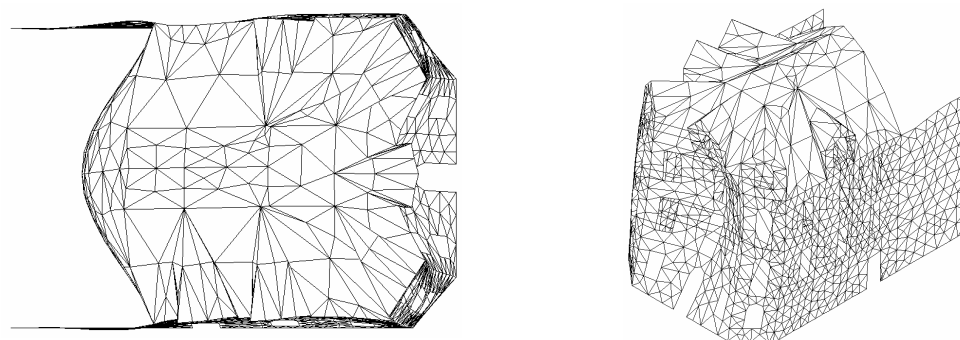




*Figura 6 – Malhas de elementos finitos da estrutura do edifício*



*Figura 7 - 1º Modo, 2.553 Hz (Planta e Perspectiva)*



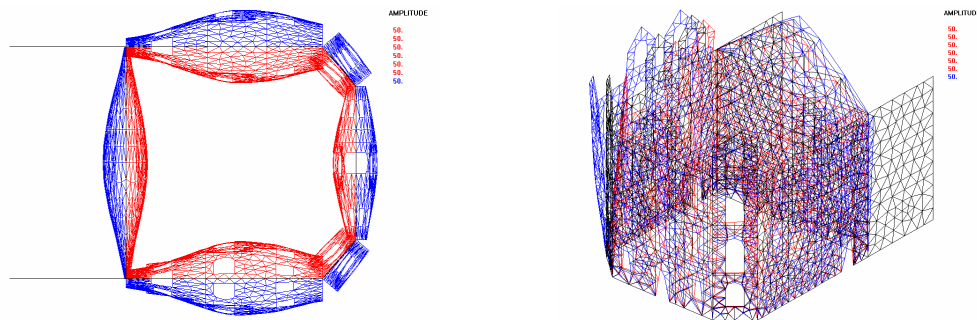
*Figura 8 - 2º Modo, 2.731 Hz (Planta e Perspectiva)*

A estrutura do edifício foi numericamente analisada sob a acção dos acelerogramas registados no local, mais precisamente ao nível das fundações do Observatório Príncipe de Mónaco, situado na Cidade da Horta, Ilha do Faial (Oliveira *et al.*, 1998). Foram consideradas as três componentes do sismo de 9 de Julho de 1998, para as quais o valor máximo da aceleração atingiu  $360 \text{ cm/s}^2$  numa das direcções horizontais.

A resposta sísmica da estrutura da Igreja foi obtida em regime linear elástico por integração no domínio do tempo através do método de Newmark, tendo sido adoptada a formulação de Rayleigh para a consideração do amortecimento estrutural do tipo viscoso, com coeficiente de amortecimento de cerca de 5%.

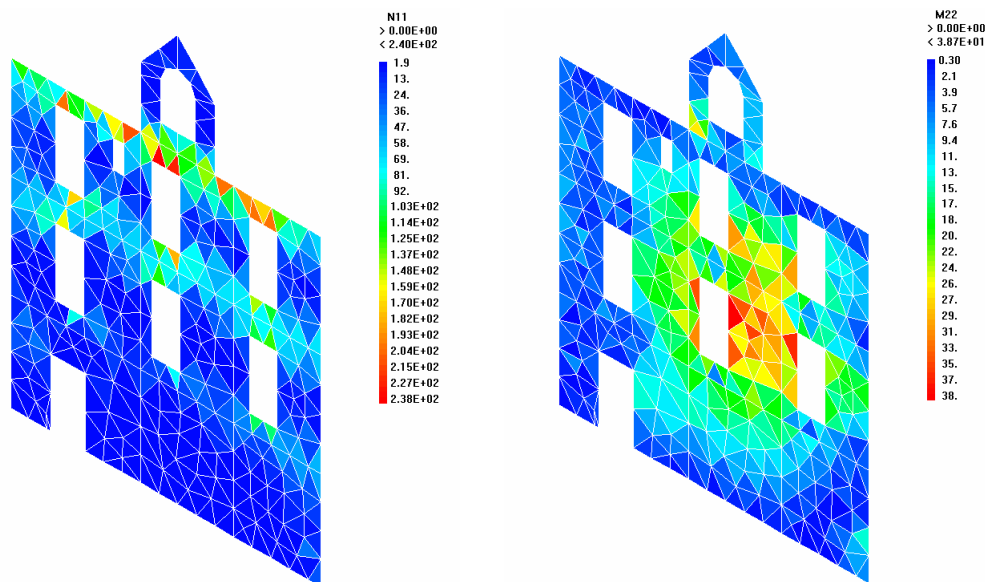
Esses cálculos permitiram a obtenção dos deslocamentos em diversos pontos, em planta e em altura, e a determinação dos esforços e tensões nas paredes ao longo do tempo de análise, seguida do registo dos correspondentes valores máximos.

Assim, na fig. 9 apresenta-se uma envolvente dos deslocamentos máximos normais às paredes (nos dois sentidos, conforme o sinal da excitação) da qual se pode confirmar o já referido efeito de pipa.



*Figura 9 - Deslocamentos Máximos Normais às Paredes (50x) (Planta e Perspectiva)*

De modo idêntico e a título de exemplo, na fig. 10 ilustram-se as distribuições dos esforços normais e dos momentos flectores máximos numa das paredes do edifício, neste caso a parede 1 que se reporta à fachada principal. Em particular, estão representados os esforços normais de tracção horizontal que revelam maiores tracções na parte superior, em virtude da tendência de destaque das paredes de fachada transversais a esta na zona do cunhal. Também os momentos flectores verticais são mais elevados na zona interior daquele pano de parede, evidenciando aí maiores curvaturas características do efeito de pipa.



*a) Esforços normais horizontais máximos*

*b) Momentos flectores verticais máximos*

*Figura 10 – Esforços normais e de flexão na parede 1 (fachada principal)*

#### 4.- ANÁLISE SUMÁRIA DOS RESULTADOS

Da consulta dos resultados obtidos para uma acção sísmica que é 2.4 vezes superior à acção sísmica regulamentar (Ravara *et al.*, 1984), foi possível concluir que as tensões verticais e horizontais de tracção são de valor reduzido, salvo em pontos singulares que têm a ver com a modelação usada ou em zonas especiais, como as padieiras e os arcos.

As tensões verticais de compressão apresentam, em média e na base da parede, valores que variam entre 0.3 MPa (3 Kg/cm<sup>2</sup>) e 0.4 MPa (4 Kg/m<sup>2</sup>); tal como referido, aparecem zonas pontuais onde as tensões aumentam até cerca de 0.6 MPa, por razões ligadas à malha adoptada.

Os momentos flectores horizontais, a que corresponderá a armadura horizontal, apresentam o seu máximo variando entre 30 a 50 kN.m/m e ocorrendo na zona central das paredes. De facto, em virtude da fraca rigidez e do deficiente travamento conferido pelos pisos intermédios, a parede funciona como uma laje apoiada no terreno, na cobertura e, com maior ou menor grau de eficiência, nas paredes transversais que concorrem nos cunhais.

De igual modo para os momentos verticais, a que corresponde a armadura vertical, o máximo aparece também na zona central, com valores em torno de 40 kN.m/m.

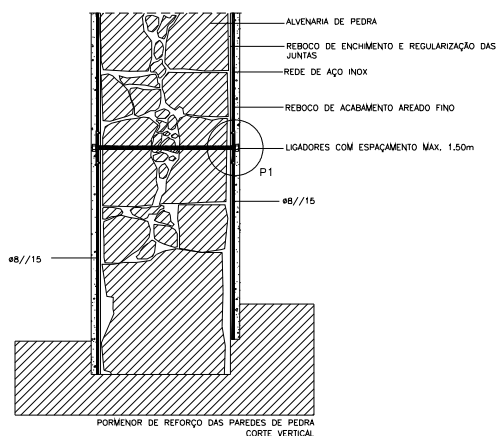
#### 5.- SOLUÇÃO DE REFORÇO E CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

A intervenção proposta consiste no reforço de paredes, pavimentos e coberturas, sempre que possível mantendo os materiais existentes, e na cintagem dos pavimentos de madeira e coberturas, com especial atenção às ligações entre os vários tipos de elementos estruturais, por forma a garantir o seu funcionamento conjunto quando submetidos à acção sísmica.

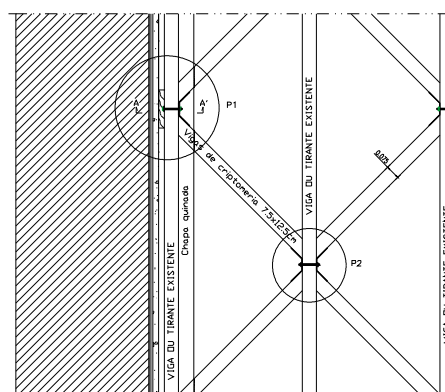
##### 5.1.- Paredes

As paredes exteriores em alvenaria de pedra deverão ser devidamente picadas nas duas faces, com limpeza a jacto de água antes da aplicação das argamassas. A alvenaria é regular e de boa qualidade, não necessitando portanto de tratamento especial do seu interior.

O reforço destas paredes deverá ser executado de acordo com o esquema da fig. 11-a, segundo o qual, após a limpeza da parede a jacto de água, se procederá à aplicação do reboco de regularização na parede humedecida e à colocação da rede de aço inox com posterior reboco de recobrimento e acabamento areado para receber a pintura final. As paredes livres, e paralelas às vigas do pavimento e aos tirantes da cobertura, serão travadas ao nível da cobertura e dos pavimentos tal como se esquematiza na fig. 15-b.



a) Reforço com rede de aço inox

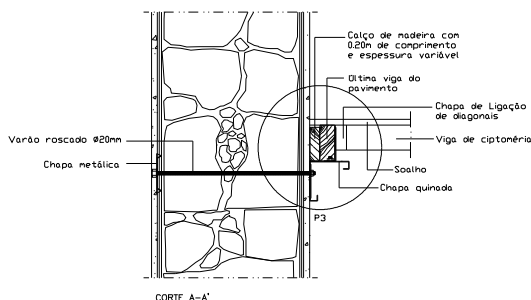


b) Travamento das paredes livres

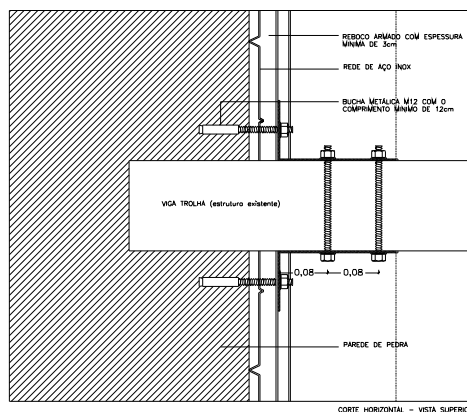
Figura 11 – Esquemas de reforço das paredes

## 5.2.- Pavimentos

Os pavimentos existentes deverão ser em grande parte mantidos, procedendo-se à substituição dos elementos estruturais e do soalho que se encontrem deteriorados. As ligações das vigas de madeira às paredes resistentes que lhes dão apoio serão reforçadas pela introdução de um perfil em chapa quinada de acordo com a fig. 12-a. A viga trolha (ou viga principal) deverá ser mantida e as vigas de madeira, que nela apoiam, serão ligadas por forma a conferir-lhes continuidade. Por outro lado as vigas deverão ser convenientemente ligadas às paredes, conforme indicado na fig. 12-b.



a) *Ligação pavimento - parede*

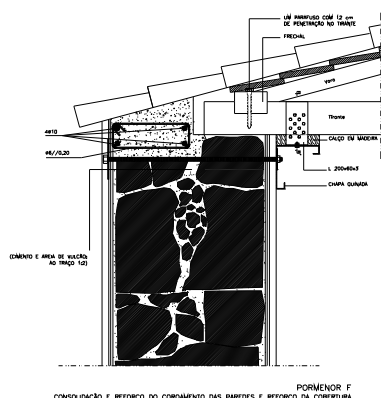


*b) Ligação da viga trolha - parede*

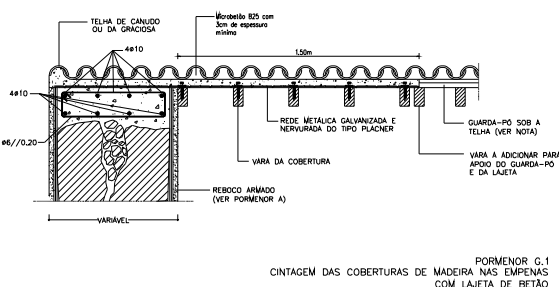
*Figura 12 – Ligações de pavimentos e vigas às paredes*

### 5.3.- Cobertura

A cobertura tem um papel fundamental no comportamento desta estrutura, dado que lhe confere apoio ao nível superior. Atendendo à sua forma, esta comporta-se como uma casca, constituindo um elemento bastante rígido desde que seja devidamente solidarizado. Para isso deverá ser adoptado o procedimento ilustrado no pormenor da fig. 13-a, de modo a garantir a ligação dos tirantes às paredes exteriores através duma cantoneira em chapa quinada que deverá coar todo o perímetro do edifício, sendo assegurada a continuidade nos cantos. As diversas peças de madeira que realizam a cobertura deverão ser inspeccionadas e substituídas no caso de não estarem em boas condições de conservação e funcionamento. As empenas deverão ser travadas ao nível da cobertura, segundo o esquema ilustrado no pormenor detalhado na fig. 13-b.



*a) Apoio e ligação da cobertura à parede*



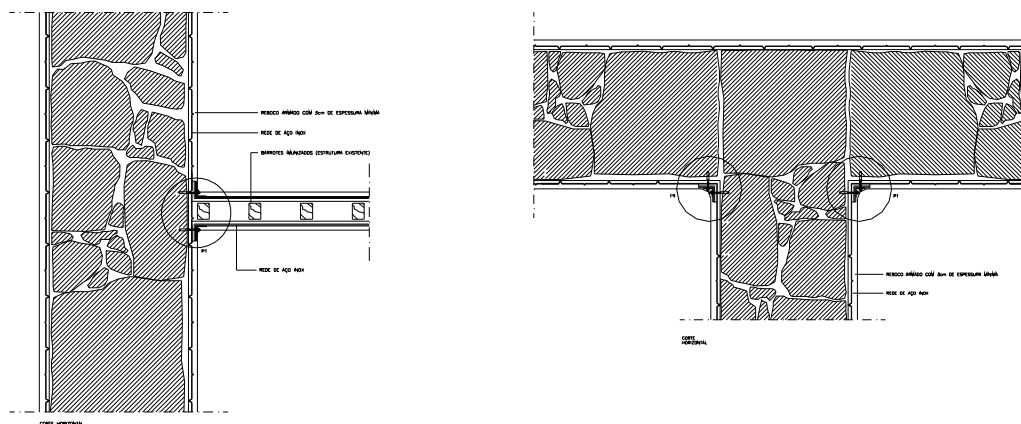
*b) Travamento das empenas na cobertura*

*Figura 13 – Ligações da cobertura às paredes*



#### 5.4.- Outros elementos estruturais

Na estrutura em análise, duas das paredes interiores serão reforçadas na sua ligação à parede exterior, conforme o detalhe apresentado na fig. 14-a. A parede meeira será também devidamente reforçada (usando-se a solução descrita para as paredes exteriores) e será convenientemente ligada às paredes exteriores de acordo com o processo ilustrado na fig. 14-b.



a) Parede interior - parede exterior

b) Parede meeira - parede exterior

Figura 14 – Ligações várias às paredes exteriores

#### 5.5.- Considerações gerais sobre o dimensionamento dos elementos de reforço

Os valores obtidos para as tensões e os esforços normais e de flexão, e o facto de a acção sísmica de projecto ( $150 \text{ cm/s}^2$ ) (Ravara *et al.*, 1984) corresponder a um valor 2.4 vezes menor do que o valor da aceleração usada no cálculo, ( $360 \text{ cm/s}^2$ ) sugere os seguintes comentários:

- i) O nível de tensões é baixo, nomeadamente o de compressões. As tensões horizontais de tracção apresentam valores mais altos, como resultado do funcionamento da parede apoiada nas extremidades e flectindo para fora ou para dentro em função do sinal da excitação. Estes valores são no, entanto, consideravelmente reduzidos com as ligações da parede ao nível dos pisos (segundo o esquema atrás referido) e com um eficaz travamento dos cunhais para ligar adequadamente as paredes aí concorrentes.
- ii) Os máximos momentos flectores calculados para as paredes (cerca  $17 \text{ kN.m/m}$ ) virão muito atenuados com a fixação da parede ao longo da altura (ao nível dos pisos). Note-se porém que, para este valor do momento, seria necessário dispôr de uma armadura com uma área igual a  $0.9 \text{ cm}^2/\text{m}$  nas duas direcções, o que é conseguido com a malha de aço prevista para o reforço das paredes.
- iii) A parede meeira e a parede paralela a esta (ver fig. 4) são bastante altas, necessitando de ser travadas ao longo da altura e de ter adequadamente em conta as suas ligações às outras paredes. Para tal, deverá ser adoptada a já referida disposição de um reboco armado e de cantoneiras em chapa quinada por forma a ligar tais paredes entre si e aos pisos.
- iv) Ao nível das fundações as tensões são baixas, pelo que não será necessário tomar nenhuma medida especial.

#### 6. CONCLUSÕES

Em função da observação dos danos e da análise dos resultados obtidos na análise numérica efectuada foi possível concluir que o nível de tensões instalado no edifício em análise é compatível com o tipo de construção que se faz na zona urbana. No entanto, torna-se imperativo tomar em consideração alguns procedimentos indispensáveis na construção antisísmica,

nomeadamente no que se refere ao funcionamento em conjunto dos edifícios e ao travamento das paredes ao longo da altura, procurando em particular, e sempre que possível, evitar a ocorrência do o chamado “efeito de pipa” que, no caso vertente, se poderia ter verificado.

É convicção dos autores que, com o tipo de intervenção proposto, que se pode considerar minimalista já que tira partido dos elementos existentes, reforçando-os pontualmente e adequando-os à função estrutural que devem desempenhar, a estrutura do edifício após reforço estará em condições de suportar com segurança futuros eventos sísmicos.

## **8. AGRADECIMENTOS**

Agradece-se a todos os colegas que colaboraram na realização deste trabalho e ao C.P.R. a disponibilidade manifestada.

## **9. REFERÊNCIAS**

CEA - CASTEM 2000. (1990).Guide d'utilisation, CEA, France.

Oliveira, C. S.; Sousa, M. L.; Guedes, J. H. C.; Martins, A.; Campos-Costa, A. (1998) , *A Crise Sísmica do Faial/Pico/São Jorge Iniciada a 9 de Julho de 1998 Vista na Rede Acelerográfica dos Açores*, 1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Lagos, Nov. pp 75-79.

Ravara, A.; Duarte, R.T.; Carvalho, E.C. (1984) , *Engenharia Sísmica de Pontes*, ICT, Especialização e Aperfeiçoamento. Estruturas. S318, LNEC, Lisboa.